

Физическая химия и физика металлургических систем

УДК 669.017

DOI: 10.14529/met170301

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В ЖИДКИХ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИТТРИЕМ И ХРОМОМ

Г.Г. Михайлов, Л.А. Макроец

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В рамках термодинамического моделирования рассматривается взаимодействие между компонентами металлического расплава и кислородом применительно к анализу процессов раскисления и легирования низкоуглеродистых низколегированных сталей, содержащих хром и иттрий. В данной работе использован метод построения поверхностей растворимости компонентов в жидком металле термодинамической системы Fe–Y–Cr–O–C. В рамках реализации этого метода детально исследована система Y_2O_3 – Cr_2O_3 , определены энтальпия и энтропия образования соединения $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, уточнены координаты точек эвтектического преобразования в системе Y_2O_3 – Cr_2O_3 . На основании уточненных координат линий ликвидус для оксидных двойных систем FeO– Cr_2O_3 , FeO– Y_2O_3 , и Y_2O_3 – Cr_2O_3 определены энергетические параметры Q_{ijkl} в уравнениях зависимости активностей компонентов оксидного расплава FeO– Cr_2O_3 – Y_2O_3 от состава в модели субрегулярных ионных растворов и рассчитаны координаты поверхности ликвидус оксидной системы FeO– Cr_2O_3 – Y_2O_3 . Так как углерод не растворим в оксидной системе, сопряженной с областью существования жидкого металла, установлено, что в качестве конденсированных неметаллических фаз после легирования металла хромом и модифицирования иттрием образуются оксиды Y_2O_3 и Cr_2O_3 , соединения $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, оксидный расплав (FeO, Cr_2O_3 , Y_2O_3) и газовая фаза {CO, CO_2 }. Дополнительные термодинамические расчеты показали возможность наличия в оксидном расплаве до 2 % двухвалентного хрома (Cr^{2+}).

Разработанная схема фазовых равновесий позволила установить константы равновесия образования оксидов, соединения оксидов, оксидных компонентов расплава и газовых фаз. Рассчитаны также по методу Вагнера активности компонентов металлических расплавов. Совокупность установленных термодинамических параметров позволила построить диаграмму поверхности растворимости компонентов в жидком металле (ПРKM) и таким образом связать составы жидкой металлической фазы с составом сопряженных оксидных фаз.

Ключевые слова: фазовые равновесия; иттрий; хром; диаграммы состояний; термодинамика; раскисление.

В современном сталеплавильном процессе при выплавке углеродистых малолегированных конструкционных марок сталей повышение механических и эксплуатационных свойств стали добиваются введением в глубокораскисленный и провакуумированный металл сплавов, содержащих редкоземельные элементы [1, 2]. Введение РЗМ существенно измельчает литое зерно стали [3, 4], глобуляризует неметаллические включения в стали [4]. Иттрий вводится в металл с целью повышения поверхностной жаростойкости стали. Значительная часть публикаций по этим проблемам отмечает суммарное действие многокомпонентных по РЗМ сплавов [5].

Приводятся также данные по использованию сплавов РЗМ цериевой группы [6], иттриевой группы [7], мишметалла [8]. Но зачастую в табличных данных приводятся просто цифры суммарного содержания редкоземельных элементов – Ce, La, Pr, Nd под общим обозначением РЗМ. Несмотря на в целом схожие химические свойства, в неметаллических включениях присутствуют РЗМ и в виде оксидных, и в виде сульфидных фаз в разных кристаллических образованиях [1]. Это связано и с разным химическим составом используемых сплавов, и с разным средством редкоземельных металлов к кислороду. Для того чтобы появилась возможность дифференци-

рования участия редкоземельных металлов в процессе раскисления, необходимо рассмотреть частные жидкометаллические системы, содержащие отдельные редкоземельные элементы. Вообще говоря, иттрий не относится формально к редкоземельным элементам, но по своим химическим свойствам он близок к редкоземельным металлам. Кроме того, оксиды иттрия входят в состав редкоземельных сырьевых материалов. В настоящей работе предлагается подробно рассмотреть термодинамику процессов раскисления стали иттрием. В методику расчетов входит выполнение ряда операций [9]. В частности, необходимо установить значения констант равновесия для реакций раскисления стали иттрием с образованием оксидов, комплексных оксидных соединений, значения констант равновесия для реакций образования жидких и газообразных фаз [9]. Далее, необходимо построить диаграммы состояний равновесных с металлом оксидных диаграмм состояний и на основании этих данных разработать метод построения поверхностей растворимости компонентов

(иттрия, хрома, кислорода и углерода) в жидком металле (ПРКМ) [10]. На таких диаграммах устанавливаются составы металла, находящегося в равновесии с соответствующими оксидными фазами.

На рис. 1 приведены результаты расчета координаты линий ликвидус, точек эвтектических превращений, а так же определены температуры и теплоты плавления оксидов Y_2O_3 , Cr_2O_3 и соединения $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$. Штриховой линией обозначены литературные данные [11], сплошной линией приведены данные, полученные расчетным путем в данной работе. Температуры плавления оксидов и соединения, используемые в расчете, взяты из справочника [11]. Некоторые расхождения с литературными данными наблюдаются в химическом составе эвтектик. Эти данные приведены в табл. 1. При получении расчетных табличных данных использовалась теория субрегулярных растворов. Расчетные формулы активностей в соответствии с этой теорией получены в приближении квадратичной зависимости координационного числа катионов в

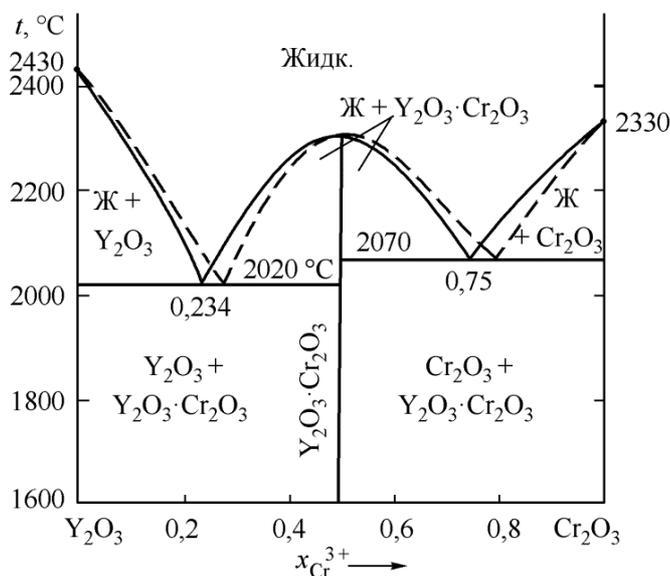


Рис. 1. Диаграмма состояний системы $Y_2O_3-Cr_2O_3$: сплошная линия, пунктир – литературная [11]

Таблица 1

Координаты инвариантных точек для системы $Y_2O_3-Cr_2O_3$

Фаза	Природа равновесия	Состав, мол. % Y_2O_3		$T, ^\circ C$	
		расчет	[11, 12]	расчет	[11, 12]
$Cr_2O_3 + Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3 + \text{жидкость}$	Эвтектическое	25	20	2070	2070
$Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3 + \text{жидкость}$	Плавление	50	50	2300	2300
$Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3 + Y_2O_3 + \text{жидкость}$	Эвтектическое	76,6	72	2020	2020
$Y_2O_3 + \text{жидкость}$	Доп. точка	91,2		2300	

расплаве от состава, выраженного через ионные доли катионов [9].

Для оксидных расплавов системы $Y_2O_3-Cr_2O_3$ активности оксидов можно представить следующими выражениями:

$$\ln a_1 = 2 \ln x_1 + 2 \left[3x_1^2 x_2^2 Q_{1112} + x_1 x_2^2 (2 - 3x_1) Q_{1122} + x_2^3 (1 - 3x_1) Q_{1222} \right] / (RT);$$

$$\ln a_2 = 2 \ln x_2 + 2 \left[x_1^3 (1 - 3x_2) Q_{1112} + x_1^2 x_2 (2 - 3x_2) Q_{1122} + 3x_1^2 x_2^2 Q_{1222} \right] / (RT),$$

где Y_2O_3 – 1-й компонент, Cr_2O_3 – 2-й компонент.

По характерным экспериментальным координатам диаграммы состояний $Y_2O_3-Cr_2O_3$ (см. рис. 1) установлены величины энергий смешения:

$$Q_{1112} = -7075,$$

$$Q_{1122} = -23\,192,$$

$$Q_{1222} = -5395 \text{ кал/моль},$$

а так же рассчитаны термодинамические данные для образования соединения $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ (энтальпия и энтропия) из компонентов оксидного расплава:

$$\Delta_m H_{T_m}^\circ = 63\,340 \text{ кал/моль},$$

$$\Delta_m S_{T_m}^\circ = 15,64 \text{ кал/(моль} \cdot \text{К)}.$$

В табл. 2 приведены константы реакций плавления, используемые для расчета диаграммы состояний системы $Y_2O_3-Cr_2O_3$ (реакции (2)–(4)).

При введении в сталь иттрия и хрома состав продуктов раскисления определяется на диаграмме состояний $FeO-Y_2O_3-Cr_2O_3$. В литературе отсутствуют какие-либо надежные сведения о диаграмме состояний $FeO-Y_2O_3-Cr_2O_3$. Поэтому по данным уже исследованных двойных диаграмм состояний $FeO-Y_2O_3$ [13], $FeO-Cr_2O_3$ [14] и изученной в данной работе системы $Y_2O_3-Cr_2O_3$ были установлены энергетические параметры теории субрегулярных растворов для тройных систем [9]. Эти сведения представлены в табл. 3.

На рис. 2 представлен расчетный (смоделированный) вариант диаграммы состояний $FeO-Y_2O_3-Cr_2O_3$. Были выполнены также расчеты координат (состав и температура) инвариантных равновесий для данной диаграммы (табл. 4).

Из вида тройной оксидной диаграммы следует, что в легированной хромом и модифицированной иттрием стали, в зависимости от температуры и состава металла, возможно образование твердых оксидов $|Cr_2O_3|$ и $|Y_2O_3|$, соединений $|FeO \cdot Cr_2O_3|$ и $|Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3|$ и оксидного расплава (FeO, Y_2O_3, Cr_2O_3). Но оксидный расплав может включать в себя еще и оксид хрома (II). Его активность была приравнена к ионной доле. Активности остальных компонентов оксидного расплава FeO, Y_2O_3, Cr_2O_3 рассчитывали по теории субрегулярных ионных растворов с использованием параметров, приведенных в табл. 3.

Таблица 2

Термодинамические данные для реакций фазовых превращений, K – константа плавления оксидов и их соединений

№	Реакция	$\lg K = -A/T + B$	
		A	B
1	$ FeO = (FeO)$	1749	1,061
2	$ Y_2O_3 = (Y_2O_3)$	4372	1,617
3	$ Cr_2O_3 = (Cr_2O_3)$	6557	2,519
4	$ Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3 = (Y_2O_3) + (Cr_2O_3)$	13 845	3,419
5	$ FeO \cdot Cr_2O_3 = (FeO) + (Cr_2O_3)$	12 093	4,894

Таблица 3

Параметры теории субрегулярных ионных растворов $FeO-Y_2O_3-Cr_2O_3$

Система	Энергетические параметры, кал/моль			Источник
$FeO-Y_2O_3$	0	0	0	[13]
$FeO-Cr_2O_3$	1042	6382	1283	[14]
$Y_2O_3-Cr_2O_3$	-7075	-23 192	-5395	Данная работа
$FeO-Y_2O_3-Cr_2O_3$	-9000	-18 000	-17 000	Данная работа

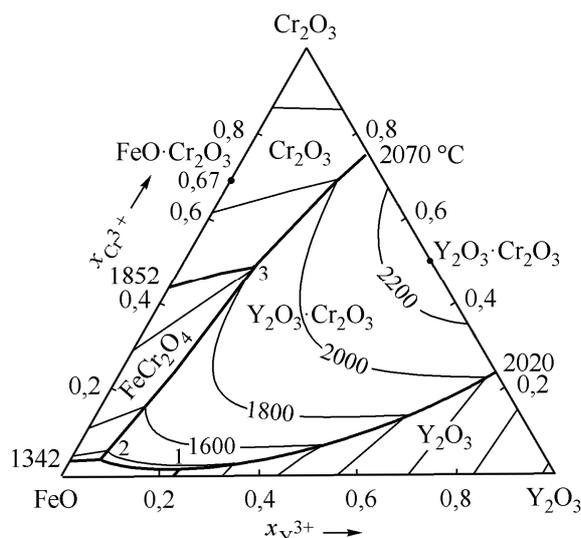


Рис. 2. Расчетные координаты поверхности ликвидус системы FeO–Y₂O₃–Cr₂O₃ для температур выше 1400 °С

Таблица 4

Инвариантные точки системы FeO–Y₂O₃–Cr₂O₃

№ точки	Равновесие	Состав, ион. доли			T, °C
		x _{Fe²⁺}	x _{Y³⁺}	x _{Cr³⁺}	
1	FeO + Y ₂ O ₃ ·Cr ₂ O ₃ + Y ₂ O ₃ + жидкость	0,77	0,22	0,01	1216
2	FeO·Cr ₂ O ₃ + FeO + Y ₂ O ₃ ·Cr ₂ O ₃ + жидкость	0,90	0,06	0,04	1314
3	FeO·Cr ₂ O ₃ + Cr ₂ O ₃ + Y ₂ O ₃ ·Cr ₂ O ₃ + жидкость	0,37	0,15	0,48	1789

В табл. 5 приведены все возможные реакции, протекающие в хромсодержащем железе, раскисленном иттрием.

Активность компонентов в металлическом расплаве рассчитывалась с помощью параметров взаимодействия (по теории Вагнера), их численные значения приведены в табл. 6. Параметр e_{Cr}^Y в литературе не приво-

дится. Но известны параметры взаимодействия хрома с сильными раскислителями [16]:

$$e_{Cr}^{La} = 0,0108, e_{Cr}^{Ce} = 0,00642, e_{Cr}^{Zr} = 0,013, \\ e_{Cr}^{Mg} = 0,01213, e_{Cr}^{Ca} = 0,016, e_{Cr}^{Al} = 0,00255.$$

Видно, что параметр взаимодействия хрома e_{Cr}^Y в этом случае может быть порядка 0,01. Были проведены расчеты ПРКМ Fe–Y–Cr–O–C

Таблица 5

Зависимости констант равновесия реакций раскисления от температуры

№	Реакция	$\lg K = -A/T + B$	
		A	B
1	(FeO) = [Fe] + [O]	6320	4,734
2	(Y ₂ O ₃) = 2[Y] + 3[O]	67 028	20,19
3	(Cr ₂ O ₃) = 2[Cr] + 3[O]	33 460	14,85
4	(CrO) = 2[Cr] + [O]	8203	4,51
5	[Y ₂ O ₃] = 2[Y] + 3[O]	71 400	21,81
6	[Cr ₂ O ₃] = 2[Cr] + 3[O]	40 014	17,37
7	[FeO·Cr ₂ O ₃] = [Fe] + 2[Cr] + 4[O]	51 870	24,48
8	[Y ₂ O ₃ ·Cr ₂ O ₃] = 2[Y] + 2[Cr] + 6[O]	114 333	38,459
9	{CO} = [C] + [O]	1168	-2,07
10	{CO ₂ } = [C] + 2[O]	9616	2,51

Таблица 6

Параметры взаимодействия e_i^j в жидком железе, $T = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ [15–17]

Элемент i	Элемент j			
	Cr	Y	O	C
Cr	-0,0003	0	-0,133	-0,104
Y	0	0,030	-4,41	-1,21
O	-0,041	-0,79	-0,2	-0,45
C	-0,024	-0,16	-0,34	0,14

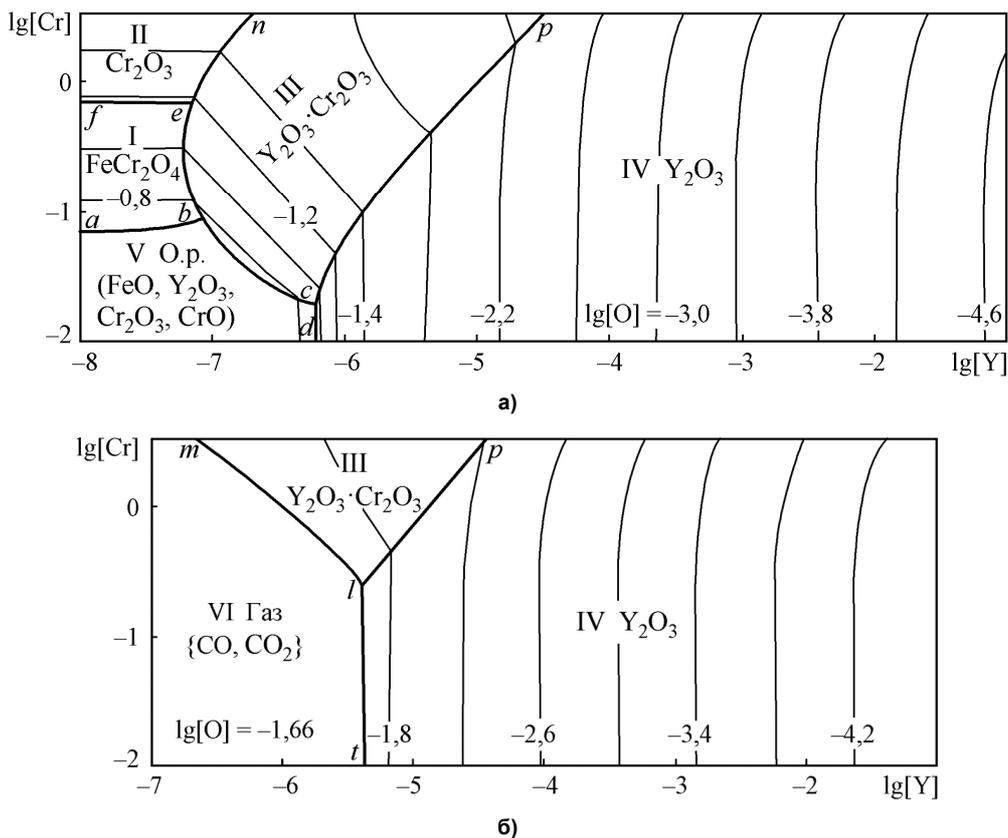


Рис. 3. ПРКМ системы Fe–Y–Cr–O–C, 1600 °C, $P_{\text{общ}} = 1 \text{ атм}$: а) [C] = 0; б) [C] = 0,1 мас. %

для условий $e_{\text{Cr}}^{\text{Y}} = 0$ и $e_{\text{Cr}}^{\text{O}} = 0,01$. Незначительная разница в результатах расчета начинает проявляться только при $[\text{Y}] > 10^{-4}$ мас. % и $[\text{Cr}] > 1$ мас. %. Поэтому при более низких концентрациях Cr и Y можно считать величину $e_{\text{Cr}}^{\text{Y}} \approx 0$, что и было принято в расчетах.

Для расчета координат поверхности растворимости необходимо так же определить константы равновесия для основных реакций раскисления. Эти данные представлены в табл. 5.

На рис. 3, а представлены ПРКМ системы Fe–Y–Cr–O при 1600 °C. На полях рисунка заданы составы металла, равновесного с указанными на этих полях оксидными фазами.

На контрастных линиях заданы составы металла, равновесного с двумя соседними оксидными фазами, в узлах пересечений определены составы металла, равновесного с тремя оксидными фазами. Тонкими линиями обозначены изокислородные сечения ПРКМ. На рис. 3, б представлена ПРКМ системы Fe–Y–Cr–O–C при [C] = 0,1 мас. %. В области VI заданы составы жидкого металла, равновесного с газовой фазой (CO, CO₂) на основе CO.

Заключение

1. Рассмотрены термодинамические закономерности процессов раскисления иттрием хромсодержащей конструкционной стали. Впервые в приближении теории субрегуляр-

ных ионных растворов построены диаграммы состояний оксидных систем $Y_2O_3-Cr_2O_3$ и $FeO-Y_2O_3-Cr_2O_3$. В результате расчетов диаграммы $Y_2O_3-Cr_2O_3$ подобраны термодинамические данные для образования соединения $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ ($\Delta_m H_{T_m}^\circ = 63\,340$ кал/моль, $\Delta_m S_{T_m}^\circ = 15,64$ кал/(моль·К)) из компонентов оксидного расплава.

2. Установлены оксидные фазы, образующиеся после введения иттрия в хромосодержащую малоуглеродистую сталь. Показано, что в зависимости от температуры и исходного состава стали в качестве неметаллических включений могут образовываться твердые Y_2O_3 , Cr_2O_3 , $FeO \cdot Cr_2O_3$, $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, жидкие оксиды (FeO , Cr_2O_3 , Y_2O_3 , CrO) и газовая фаза $\{CO, CO_2\}$.

3. Разработана методика расчета построения поверхностей растворимости компонентов (ПРKM) в жидком металле системы $Fe-Y-Cr-O-C$. Установлена возможность образования в качестве неметаллических включений твердого Y_2O_3 и соединения $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$.

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.A03.21.0011.

Литература

1. Голубцов, В.А. Модифицирование стали для отливок / В.А. Голубцов, В.В. Лунев. – Челябинск; Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 356 с.
2. Рябчиков, И.В. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов / И.В. Рябчиков – М.: ЭКОМЕТ, 2008. – 400 с.
3. Лунев, В.В. Применение комплексных лигатур с РЗМ и ЦЗМ для улучшения свойств литых и деформированных сталей / В.В. Лунев, Ю.В. Шульте // Влияние комплексного раскисления на свойства сталей: темат. отраслевой сб. МЧМ СССР. – М.: Металлургия, 1982. – С. 33–50.
4. Применение редкоземельных металлов в металлургии. – <http://www.urm.ru/ru/75-journal124-article64>.
5. Аверин, В.В. Применение РЗМ в металлургии стали / В.В. Аверин // Металлургические методы повышения качества стали: сб. – М., 1979. – С. 33–40.
6. Куликов, И.С. Раскисление металлов / И.С. Куликов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
7. Лопато, Л.М. Фазовые отношения в системах окись магния – окислы РЗЭ цериевой группы / Л.М. Лопато, Л.И. Лугин, А.В. Шевченко // Журнал неорганической химии. – 1971. – Т. 16, № 1. – С. 131–133.
8. Keune, H. *Chimica – ein Wissensspeicher*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim, 1959. DOI: 10.1002/bbpc.19840880624
9. Михайлов, Г.Г. Термодинамика раскисления стали / Г.Г. Михайлов, Д.Я. Поволоцкий. – М.: Металлургия, 1993. – 144 с.
10. Михайлов, Г.Г. Термодинамика металлургических процессов и систем / Г.Г. Михайлов, Б.И. Леонович, Ю.С. Кузнецов. – М.: Издат. Дом МИСИС. – 2009. – 519 с.
11. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск первый. Двойные системы / Н.А. Торопов, В.П. Барзаковский, В.В. Лапин, Н.Н. Курцева. – Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1969. – 822 с.
12. Preliminary data on subsolidus phase equilibria in the $La_2O_3-Cr_2O_3-Y_2O_3$ and $La_2O_3-Cr_2O_3-ZrO_2$ systems / M. Hrovat, S. Bernik, J. Holc et al. // *Journal of Materials Science Letters*. – 1995. – No. 14. – P. 1684–1687. DOI: 10.1007/BF00422675
13. Михайлов, Г.Г. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий с оксидными системами, содержащими РЗМ. Сообщение 2. Диаграммы состояния оксидных систем с Y_2O_3 / Г.Г. Михайлов, Л.А. Макроец // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 5–10. DOI: 10.14529/met150401
14. Михайлов, Г.Г. Термодинамический анализ процессов раскисления коррозионно-стойкой стали X18H10T кальцием и барием / Г.Г. Михайлов, Л.А. Чернова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1991, № 12. – С. 37–40.
15. Bůžek, Z. Vliv přechodných kovů na aktivitu a rozpustnost kyslíku v železe při 1600 °C / Z. Bůžek, M. Macoszek, J. Szlauer // *Hutnické listy*. – 1972. – vol. 27, no 8. – P. 547–557.
16. Параметры взаимодействия первого порядка. – http://steelcast.ru/first-order_interaction_coefficients.
17. Балковой, Ю.В. Параметры взаимодействия первого порядка в расплавах на основе железа: Обзор. информ. / Ю.В. Балковой, Р.А. Алеев, В.К. Баканов. – М.: Ин-т «Черметинформация», 1987. – 42 с.

Михайлов Геннадий Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; mikhailovgg@susu.ru.

Макровец Лариса Александровна, инженер кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; makrovetsla@susu.ru.

Поступила в редакцию 13 апреля 2017 г.

DOI: 10.14529/met170301

PHASE EQUILIBRIUM IN LIQUID IRON-CARBON ALLOYS DOPED WITH YTTRIUM AND CHROMIUM

G.G. Mikhailov, mikhailovgg@susu.ru,

L.A. Makrovets, makrovetsla@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In the framework of thermodynamic modeling, the interaction between the metallic melt components and oxygen is considered, as applied to the analysis of deoxidation and alloying processes in the low-carbon low-alloy steels containing chromium and yttrium. In this paper a plotting method solubility surfaces of components in a liquid metal of the Fe-Y-Cr-O-C thermodynamic system was used.

Within the scope of implementing that method, the Y_2O_3 - Cr_2O_3 system has been studied in detail, the enthalpy and entropy values of $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$ have been determined, and the coordinates of eutectic points in the Y_2O_3 - Cr_2O_3 system have been adjusted. Based on the adjusted coordinates of the liquidus curves for oxide binary FeO- Cr_2O_3 , FeO- Y_2O_3 , and Y_2O_3 - Cr_2O_3 systems, the energy parameters of Q_{ijkl} in the FeO- Cr_2O_3 - Y_2O_3 oxide melt component activity coefficient-composition equations for the sub-regular ionic solutions model have been determined and the coordinates of the liquidus surface of the FeO- Cr_2O_3 - Y_2O_3 system have been calculated. Since carbon is not soluble in an oxide system conjugated with a field of liquid metal, it has been found that oxides Y_2O_3 and Cr_2O_3 , $Y_2O_3 \cdot Cr_2O_3$, the oxide melt (FeO, Cr_2O_3 , Y_2O_3) and the gas phase of {CO, CO_2 } form as the condensed non-metallic phases after chrome alloying and yttrium modification of the metal. Additional thermodynamic calculations suggested the possibility of the oxide melt containing up to 2 % of bivalent chrome (Cr^{2+}).

The system of phase equilibria developed during the study allowed to establish the formation constants for oxides, oxide compounds, oxide melt components, and gas phases. Activity coefficients for the metal melts components have also been calculated using Wagner's method. The set of thermodynamic parameters established made it possible to plot the solubility surface of liquid metal components and link the liquid metal phase compositions to the conjugated oxide phase composition.

Keywords: phase equilibria; yttrium, chrome; state diagram; thermodynamics; deoxidation.

References

1. Golubtsov V.A., Lunev V.V. *Modifitsirovanie stali dlya otlivok* [Modification of Steel Castings]. Chelyabinsk, Zaporozhye, ZNTU Publ., 2009. 356 p.
2. Ryabchikov I.V. *Modifikatory i tekhnologii vnepechnoy obrabotki zhelezouglерodistykh splavov* [Modifiers and Ladle Treatment of Ferrocаrbon Alloys]. Moscow, EKOMET, 2008. 400 p.
3. Lunev V.V., Shul'te Yu.V. [Using Complex Alloys with Alkaline-Earth and Rare-Earth Elements to Improve the Properties of Cast and Deformed Steel]. *Vliyanie kompleksnogo raskisleniya na svoystva staley* [Influence of Reduction on Steel Properties]. Moscow, Metallurgiya, 1982, pp. 33–50. (in Russ.)
4. Application of rare earth metals in metallurgy. Available at: <http://www.urm.ru/ru/75-journal124-article64>.

5. Averin V.V. [The Application of REM in Metallurgy of Steel]. *Metallurgicheskie metody povysheniya kachestva stali* [Metallurgical Ways of Improving the Quality of Steel]. Moscow, 1979, pp. 33–40. (in Russ.)
6. Kulikov I.S. *Raskislenie metallov* [Metal Deoxidation]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 504 p.
7. Lopato L.M., Lugin L.I., Shevchenko A.V. [Phase Relationships in Magnesium Oxide-Cerium Subgroup R.E.E. Oxide System]. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 1971, no. 16 (1), pp. 131–133. (in Russ.)
8. Keune H. *Chimica – ein Wissensspeicher*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim, 1959. 588 p. DOI: 10.1002/bbpc.19840880624
9. Mikhailov G.G., Povolotskiy D.Ya. *Termodinamika raskisleniya stali* [Thermodynamics of Steel Deoxidation]. Moscow, Metallurgiya, 1993. 144 p.
10. Mikhailov G.G., Leonovich B.I., Kuznetsov Yu.S. *Termodinamika metallurgicheskikh protsessov i sistem* [Thermodynamics of Metallurgical Processes and Systems]. Moscow, MISiS Publ., 2009. 520 p.
11. Toropov N.A., Barzakovskiy V.P., Lapin V.V., Kurtseva N.N. *Diagrammy sostoyaniya silikatnykh sistem. Vypusk 1. Dvoynye sistemy* [Phase Diagrams of Silicate Systems. Vol. 1. Binary Systems]. Leningrad, Nauka Publ., 1969. 822 p.
12. Hrovat M., Bernik S., Holc J., Kolar D., Dacar B. Preliminary Data on Subsolidus Phase Equilibria in the $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$ and $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$ Systems. *Journal of Materials Science Letters*. 1995, no 14, pp. 1684–1687. DOI: 10.1007/BF00422675
13. Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. [Thermodynamic Simulation of Phase Equilibria of Oxide Systems Containing Rare-Earth Metals. Report 3. Phase Diagrams of Oxide Systems with Y_2O_3]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 5–10. (in Russ.). DOI: 10.14529/met150401
14. Mikhailov G.G., Chernova L.A. [Thermodynamic Analysis of the Processes of Deoxidizing Corrosion-Resistant Steel 18Cr10NiTi Calcium and Barium], *Izvestiya VUZ. Ferrous Metallurgy*, 1991, no. 12, pp. 37–40. (in Russ.)
15. Bůžek Z., Macoszek M., Szlauer J. Vliv přechodných kovů na aktivitu a rozpustnost kyslíku v železe při 1600 °C. *Hutnické listy*, 1972, vol. 27, no. 8, pp. 547–557.
16. First-Order Interaction Parameters. Available at: http://steelcast.ru/first-order_interaction_coefficients.
17. Balkovoy Yu.V., Aleev R.A., Bakanov V.K. *Parametry vzaimodeystviya pervogo poryadka v rasplavakh na osnove zheleza* [The Parameters of the First Order in the Interaction of Molten Iron-Based], Moscow, Institute Fermetinformation, 1987. 42 p.

Received 13 April 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Михайлов, Г.Г. Фазовые равновесия в жидких железоуглеродистых сплавах, легированных иттрием и хромом / Г.Г. Михайлов, Л.А. Макровец // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 5–12. DOI: 10.14529/met170301

FOR CITATION

Mikhailov G.G., Makrovets L.A. Phase Equilibrium in Liquid Iron-Carbon Alloys Doped with Yttrium and Chromium. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/met170301